

https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.283



库岸古滑坡复活变形特征及双滑带稳定性响应

杨雨亭¹, 代贞伟^{1,2*}, 陆愈实¹, 张晨阳^{1,2}, 闫慧³, 侯雪峰⁴, 唐俊刚⁴

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北武汉 430205
3. 重庆市一〇七市政公司, 重庆 401120
4. 重庆市地勘局一〇七地质队, 重庆 401120

摘要: 三峡库区存在大量的双滑带及多滑带古滑坡, 目前对库岸双滑带滑坡变形复活特征及稳定性响应特征的研究较少。以塔坪滑坡为例, 通过工程地质勘察和监测资料分析, 揭示了该滑坡变形复活特征。并进一步开展了库水位和降雨联合作用下塔坪滑坡的渗流场和稳定性数值模拟计算, 揭示了不同滑带对库水位波动和降雨的响应特征。结果表明, 塔坪滑坡为阶梯式变形模式, 每年的雨季和库水位下降期, 滑坡变形速度增大。滑坡表现为显著的前缘牵引式渐进破坏模式。降雨主要对浅层滑带的稳定性产生较大的影响, 对深层滑带的影响较小。库水位抬升, 浅层滑带的稳定性降低, 深层滑带的稳定性增大; 库水位下降, 浅层滑带的稳定性增大, 深层滑带稳定性减小。

关键词: 三峡库区; 双滑带滑坡; 复活变形特征; 稳定性; 工程地质学。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2024)04-1498-17

收稿日期: 2022-03-11

Deformation Characteristics and Stability Changes Characteristics of Reservoir Landslides with Double-Sliding Zones

Yang Yuting¹, Dai Zhenwei^{1,2*}, Lu Yushi¹, Zhang Chenyang^{1,2}, Yan Hui³, Hou Xuefeng⁴, Tang Jungang⁴

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Wuhan Center, China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, China
3. Chongqing 107 Municipal Construction Engineering Co., Ltd., Chongqing 401120, China
4. Chongqing 107 Geological Team, Chongqing 401120, China

Abstract: A large number of ancient landslides with double or multi sliding zones exist in the Three Gorge Reservoir (TGR) area. However, there are few studies on the deformation characteristics and stability changes characteristics of the reservoir landslide with double sliding zones under the action of reservoir water level (RWL) fluctuation. In this paper, the deformation characteristics of Taping landslide were obtained by filed investigation and the in-situ monitoring data. Furthermore, numerical simulation was carried out to investigate seepage filed and stability characteristics of the Taping landslide under RWL fluctuation and precipitation. Then the responses of the two different sliding zones in the Taping landslide to RWL fluctuation and precipitation were revealed.

基金项目: 重庆市自然科学基金重点项目(No. cstc2020jcyj-zdxmX0019).

作者简介: 杨雨亭(1992-), 女, 博士研究生, 从事地质灾害与安全工程方面的研究. ORCID: 0000-0002-7040-5885. E-mail: yangyt@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 代贞伟(1986-), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要从事地质灾害成灾机理与防灾减灾研究. E-mail: daizhenwei@163.com

引用格式: 杨雨亭, 代贞伟, 陆愈实, 张晨阳, 闫慧, 侯雪峰, 唐俊刚, 2024. 库岸古滑坡复活变形特征及双滑带稳定性响应. 地球科学, 49(4): 1498-1514.

Citation: Yang Yuting, Dai Zhenwei, Lu Yushi, Zhang Chenyang, Yan Hui, Hou Xuefeng, Tang Jungang, 2024. Deformation Characteristics and Stability Changes Characteristics of Reservoir Landslides with Double-Sliding Zones. *Earth Science*, 49(4): 1498-1514.

The result indicates that the Taping landslide shows a significant retrogressive failure pattern. Precipitation mainly has a greater influence on the shallow sliding zone, and the influence of precipitation on the deep sliding zone is low. As the RWL rises, the stability of the shallow sliding zone decreases and the stability of the deep sliding zone increases. As the RWL drops, the stability of the shallow sliding zone increases and the stability of the deep sliding zone decreases.

Key words: the Three Gorge Reservoir area; landslide with double-sliding zone; reactivation and deformation characteristics; stability; engineering geology.

0 引言

三峡工程于2003年6月正式蓄水发电,2008年蓄水至172 m,2010年后库水位每年在145~175 m之间周期性波动.水库蓄水后水位升降导致地下水位变化,从而触发滑坡地质灾害的报道屡见不鲜(殷跃平,2003;杨金等,2012).2003年蓄水开始后,树坪滑坡出现复活滑动变形,2008年蓄水至171 m以后,变形逐渐加剧(汪发武等,2007).凉水井滑坡在2008年水库蓄水至171 m时,出现显著的复活变形(肖诗荣等,2013).奉节县藕塘滑坡为一大型的岩质顺层古滑坡,近年来在降雨和库水位联合作用下,滑坡的前中后均出现了显著的变形复活(代贞伟等,2016).因此三峡库区蓄水后,库岸大型古滑坡的复活逐渐成为一个严重的问题,极大地影响了水库的安全运行(Huang *et al.*, 2018).

当前研究结果表明,库水位波动是诱发库岸古滑坡复活的主要诱发因素(Lane and Griffiths, 2000; Zhang *et al.*, 2023).库水位波动对滑坡稳定性的影响取决于多种因素,包括滑体的渗透性(Zangerl *et al.*, 2010)、滑面的几何形状(Paronuzzi *et al.*, 2013)、库水位波动速率等(Müller, 1964; Kamran *et al.*, 2023). Tang *et al.* (2019)将三峡库区的水库滑坡分为浮托减重型和渗流诱发型.其中,白家堡滑坡、白水河滑坡、树坪滑坡等为浮托减重型,其变形主要发生在库水高位期和库水抬升期,且该类型滑坡的滑体具有较高渗透性(卢书强等,2014a).其主要的失稳机理为库水位抬升导致滑坡前缘孔隙水压力升高,有效应力减小,诱发了滑坡的变形(卢书强等,2014b).渗流诱发型滑坡主要发生在库水快速下降期.如塔坪古滑坡(卫童瑶等,2020)和藕塘滑坡(代贞伟等,2015),这种类型的滑坡滑体具有较低的渗透性.其主要的失稳机理为,当库水位突然下降时,孔隙水压力不容易消散,从而产生向外的渗流力,且坡脚位置的水压力突然降低,在两种因素的共同作用下,诱发滑坡变形(肖捷夫等,2020).

季节性降雨也被认为是三峡库区水库滑坡变形破坏的一个重要因素(Tang *et al.*, 2019; 宋琨等, 2022).在每年的低水位期,三峡库区的降雨量较大,雨水渗入滑体,增加了滑体材料的重量,抬高了地下水位,降低了滑带土的有效应力,导致了岸坡的不稳定(代贞伟等,2015).对于大型水库滑坡,也有研究指出,后部的降雨会显著抬升其地下水位,增强低水位期,坡体内部前后缘的水头差,显著增大水力梯度,对大型滑坡的稳定性极其不利(Zhang *et al.*, 2021).

部分学者进行了库水位和降雨联合作用下水库滑坡的稳定性计算,以定量确定库岸滑坡的稳定性.Terzaghi(1950)最早通过理论分析的方法,探讨了库水位缓慢下降和快速下降两种工况下库岸边坡的稳定性.宋琨等(2011)通过数值模拟软件,提出了库水影响系数,定量计算了库水位波动时,滑坡的稳定性变化率.赵瑞欣等(2017)计算了不同库水位升降速率下,堆积层滑坡的稳定性变化规律,并基于此提出了针对堆积层滑坡的三峡库区水位调度风险等级划分方案.Huang *et al.* (2018)通过块体离散元数值计算方法,定量分析了库水位和降雨对塔坪滑坡的变形和稳定性的影响.

综上所述,目前的研究主要集中在库岸单滑带滑坡的变形破坏特征和稳定性变化规律.三峡库区存在大量双滑带以及多滑带古滑坡(邓清禄和王学平,2000;史绪国等,2019).双滑带滑坡由于不同滑带所处的位置不同,其对库水位和降雨的响应特征也显著不同,因此,库水位波动作用下,滑坡内部不同滑带的稳定性系数也不同.然而,目前对库岸双滑带在库水位波动作用下的变形复活特征及稳定性响应特征的研究较少.

本文以三峡库区塔坪滑坡为研究对象,通过工程地质勘察手段获取了该滑坡的基本特征,并分析了滑坡的原位监测资料,揭示了塔坪古滑坡的变形复活特征.最后,在以上研究的基础上,开展库水位和降雨联合作用下塔坪滑坡的渗流场数值模拟计

算,揭示了不同滑带对库水位波动和降雨的响应规律;并进一步探讨了双滑带的稳定性变化规律.本文的研究结果对深入认识库岸双滑带古滑坡的稳定性变化具有重要意义.

1 塔坪滑坡工程地质概况

巫山县塔坪滑坡位于重庆市巫山县曲尺乡,瞿塘峡出口地段左岸临江岸坡上(东经 $109^{\circ}45'13''$ 、北纬 $31^{\circ}01'36''\sim 31^{\circ}02'30''$).其平面形态呈圈椅状,后缘高程约300 m,前缘高程145~160 m.东侧以沙湾子沟为界,西侧以绞滩沟东侧山脊为界.滑坡长530~580 m,宽480~530 m,分布面积约 $27.5\times 10^4\text{ m}^2$,滑体平均厚度45 m,总方量约 $1\ 230\times 10^4\text{ m}^3$.目前,塔坪滑坡未出现整体变形,其中后部(曲尺场镇一带)处于稳定状态,而中前部(曲尺场

镇外侧斜坡)为滑坡变形复活区,长约330 m,宽450 m,分布面积约 $14.89\times 10^4\text{ m}^2$,平均厚度约为50 m,总方量约为 $634.4\times 10^4\text{ m}^3$ (图1).

滑坡区位于巫山复式向斜近核部区域,龙王庙向斜在滑坡区前缘斜交而过,北西侧出露三叠系上统须家河组底部页岩,岩层产状为 $142^{\circ}\angle 34^{\circ}$.滑坡体上出露的砂岩均为古滑坡滑移后形成的碎裂岩体,产状较为混乱,砂岩上裂隙密集发育,岩体呈块裂状,主要发育的裂隙为:裂隙①产状 $317^{\circ}\angle 82^{\circ}$,一般延伸长0.4~2.8 m,张开宽2~15 mm,间距0.05~0.45 m;裂隙②产状 $238^{\circ}\angle 86^{\circ}$,一般延伸长0.5~2.5 m,张开宽1~5 mm,间距0.12~0.55 m.

研究区出露地层为三叠系中统巴东组四段(T_2b^4)、上统须家河组(T_3xj)以及第四系全新统(Q_4)堆积层.具体可见塔坪滑坡剖面图2.



图1 塔坪滑坡全貌

Fig.1 Overview of the Taping landslide

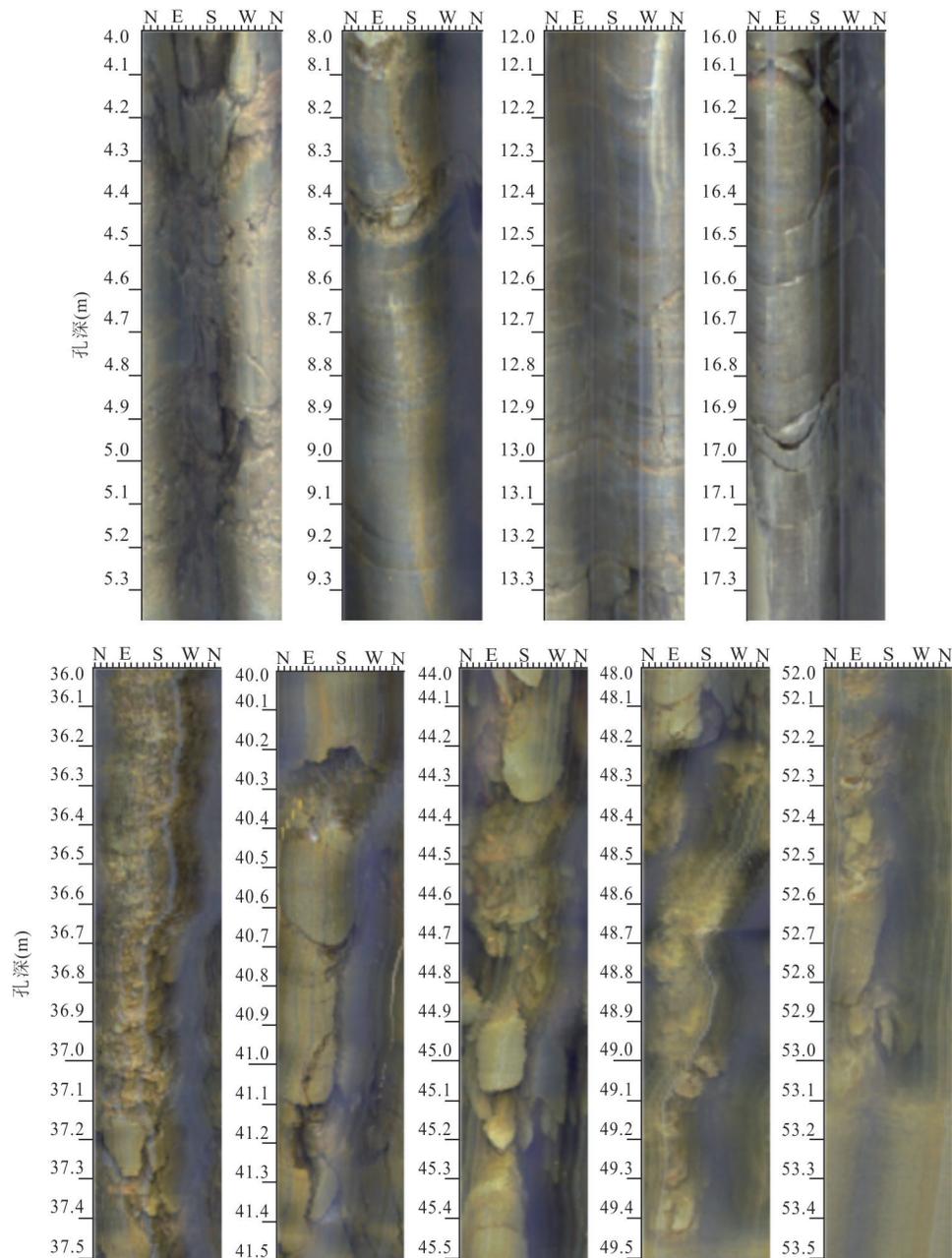


图3 滑体全孔壁摄像

Fig.3 Borehole photography

观形态和整体变形控制。

2.3.2 时间序列变形特征 图6为2009年11月至2019年4月期间,滑坡体上9个点位的水平位移—时间曲线。由于2013—2014年位移数据缺失,因此显示为虚线。如图所示,累积水平位移—时间曲线显示,塔坪滑坡为阶梯式变形模式,其特征是短时间内快速运动和长时间内缓慢运动的循环交替。雨季和库水位下降期,滑坡的运动速度增大,快速运动期从6月持续到8月。随着库水位上升和雨季结束,滑坡变形结束。相关研究表明,当水库退水时,

坡体内地下水向水库排水缓慢,形成地下水与库水位的正落差,指向坡体外侧的渗透压力增大,使得坡体稳定性降低。并且库水位下降速率越大,滑坡位移速率就越大(卢书强等,2014a)。水位抬升时,坡体前部受到较高的水头反压作用,这控制了滑坡的变形(殷跃平等,2022)。以上两种现象周而复始,导致了此类水库滑坡的阶梯式变形模式。

截至2019年4月,强烈活动区内J26监测点的最大水平位移达到933.7 mm。中等活动区内的J22监测点测得的最大水平位移可达367 mm。此外,中



图 4 塔坪滑坡变形破坏迹象

Fig.4 Deformation and failure signs of the Taping landslide
滑坡平面图所示等高线单位为 m

部位移曲线在变形时间上滞后于坡脚,滞后时间约 1~2 周.表明该滑坡为前缘牵引式破坏模式.

2.3.3 深层滑带变形特征 探槽、钻孔和测斜数据揭示了塔坪滑坡的深部变形特征.钻孔 ZK07 显示,钻孔岩心在 56 m 深度以上极其破碎.在 56~57 m 深处,岩心为泥质,呈粘土状,含有大量砾石和角砾(图 7).安装在 ZK07 的 In07 测斜仪数据也表明,2017 年 7 月 3 日至 2018 年 5 月 28 日,深部位移最大发生在 55 m 深处,可达 15.73 mm(图 8a).

2018 年 5 月 28 日后,In07 测斜管在钻孔 54~56 m 深处严重损坏.测斜仪数据还表明,岩体在 57 m 深度以下相对稳定.综合以上钻探成果和 ZK07 钻孔测斜资料分析,在 54~57 m 深度范围内存在明显的剪切带,可确定为塔坪滑坡的深层滑动面.

钻孔 ZK08 的岩心揭示了 62 m 深处存在深层滑动面,位于上三叠统须家河组(T_3xj)碎裂砂岩与石英砂岩的界面.在岩心中可以看到镜面和擦痕(图 7d).钻孔结果与测斜结果相一致,安装在 ZK08 中 In08 测斜仪数据也表明滑坡存在明显的深层剪切面.深部剪切面位于 63~66 m 深处,2017 年 8 月 19 日至 2018 年 9 月 23 日,变形可达 9 mm(图 8b).

2.3.4 浅层滑带变形特征 钻孔 ZK08 的岩心揭示了由粉质粘土组成的软层,位于 39.1~42.0 m 深处(图 7b).钻孔结果与测斜结果相一致,安装在 ZK08 中 In08 测斜仪数据也表明滑坡存在明显的浅层剪切面.该剪切面位于 38~40 m 深处,2017 年 8 月 19 日至 2018 年 9 月 23 日,变形可达 17.73 mm(图 8b).

探槽 YTJ02 揭示了,在滑坡 43.6 m 深处有一处

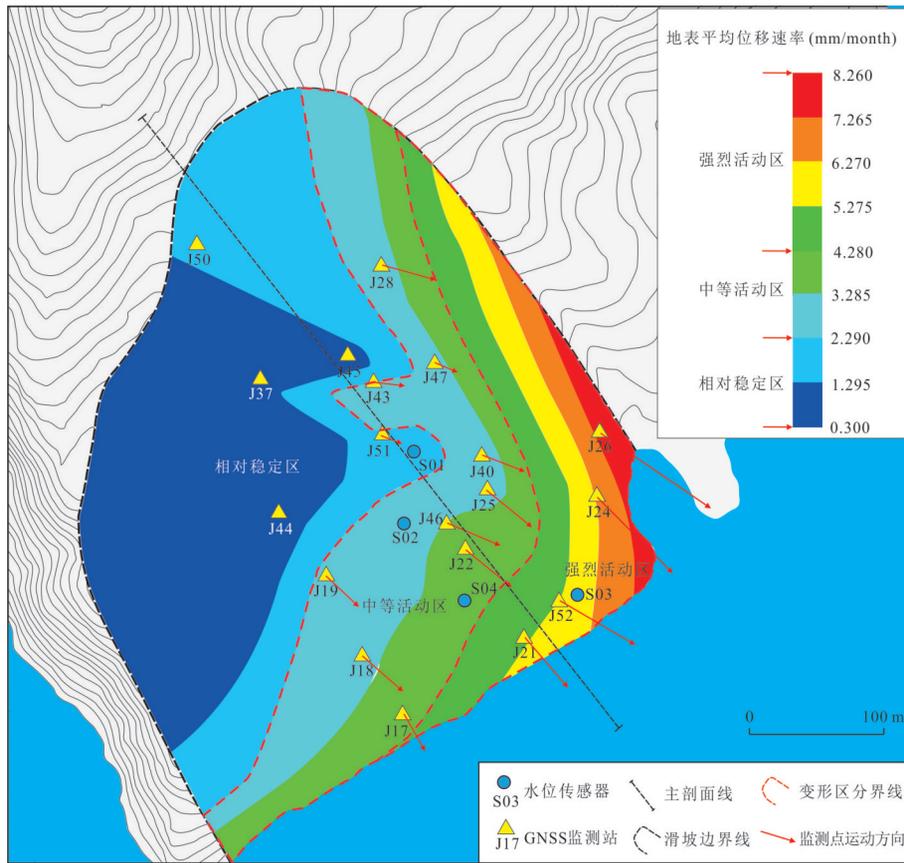


图 5 塔坪滑坡变形云图

Fig.5 Planar deformation contours of the Taping landslide

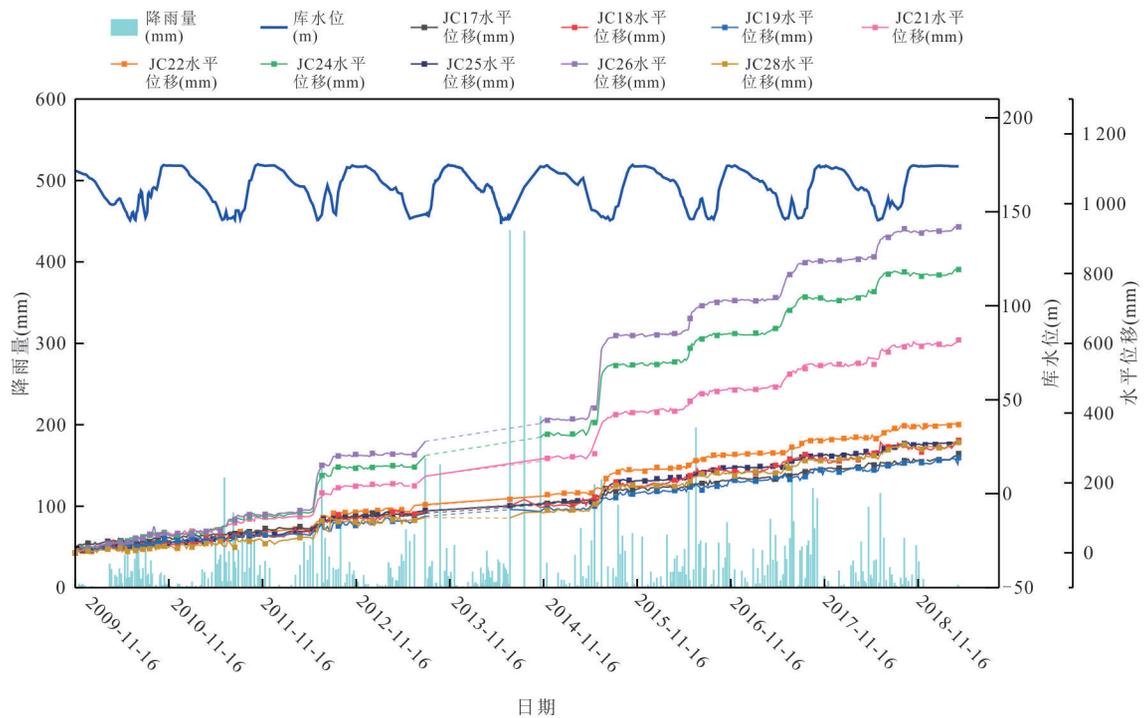


图 6 塔坪滑坡位移时间序列变形曲线

Fig.6 Time history of displacement curves of the Taping landslide

明显的滑动带,滑动面倾角约 $15^{\circ}\sim 22^{\circ}$,厚度 $0.30\sim 0.40\text{ m}$ (图 7e).滑带土主要为褐黄色粘土,夹黑色、红色砾石.砾石粒径 $5\sim 22\text{ cm}$,含量约 $30\%\sim 40\%$.滑带土微湿,可见地下水流动.

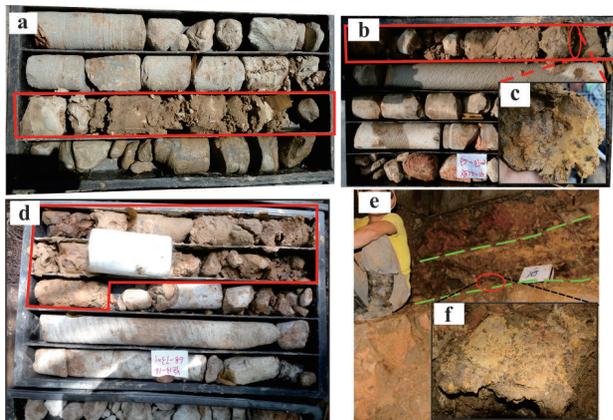


图 7 钻孔和探槽照片

Fig.7 Borehole and trenching photos

3 巫山塔坪滑坡水文地质结构与渗流特征

分析滑坡区钻孔内水位的资料以及地下水监测资料,滑坡中前部临江段的地下水主要受长江水位影响,而滑坡中后部的地下水位与库水位的联系不大,主要受大气降雨的影响.根据滑坡区的地下水监测资料可做出滑坡区高水位(库水位 175 m 高程时)及枯水位(库水位 145 m 高程时)的地下水等势线图,见图 9.由图可知, 175 m 和 145 m 库水位时,塔坪滑坡中后部的地下水位较为一致,而滑坡中前缘的地下水位区别较大.这表明塔坪滑坡中前部的地下水位受长江库水位的影响,而滑坡中后部的地下水位高程受长江库水位影响不明显.另外,在 145 m 水位线时,塔坪滑坡中前部的等水头线十分密集,这说明低水位时,塔坪滑坡前部的水力梯度较大,这对滑坡的稳定性十分不利.

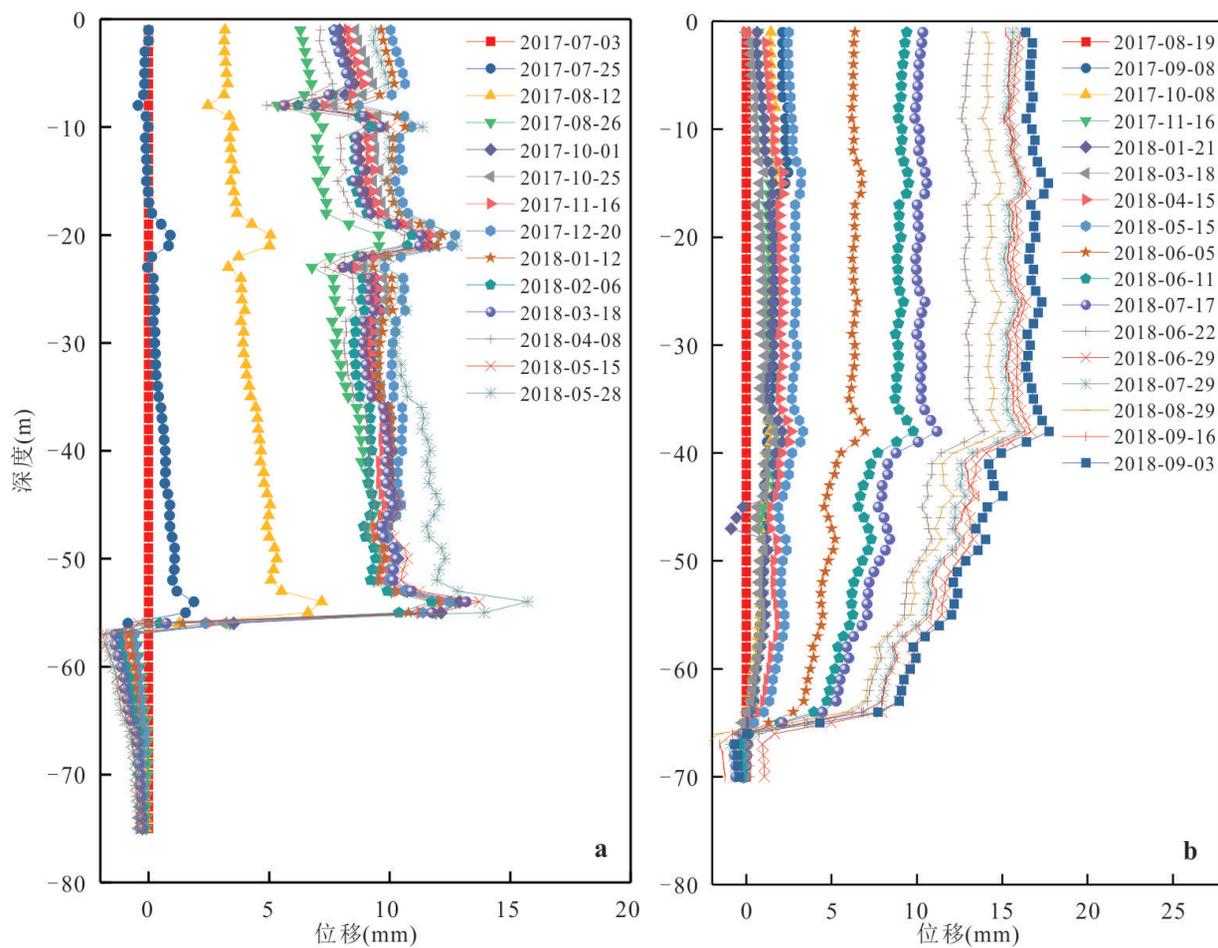


图 8 深部测斜数据

Fig.8 Inclinometer data

a.In07; b.In08

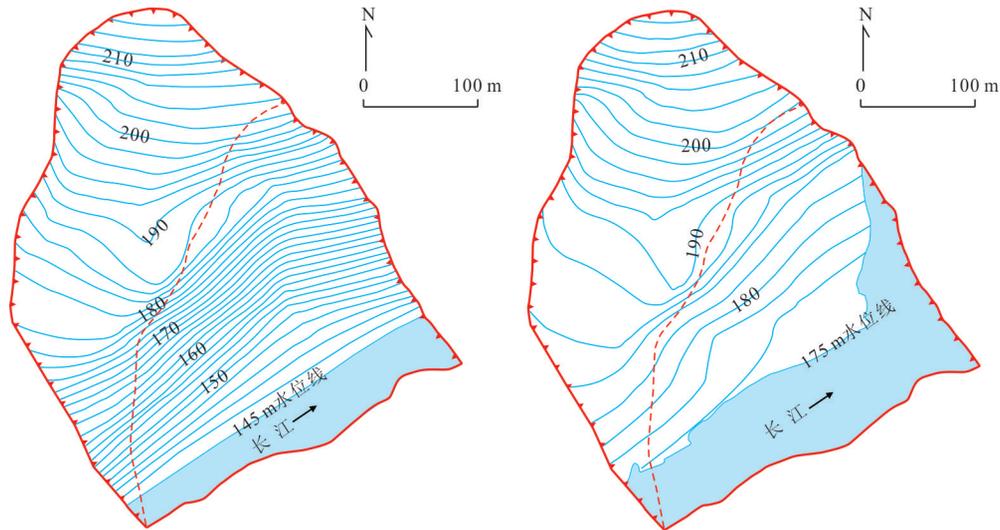


图9 巫山塔坪滑坡 175 m 库水位和 145 m 库水位时地下水水位线等势图(单位:m)

Fig.9 Isoline maps of groundwater level at 175 m and 145 m reservoir water levels in the Taping landslide

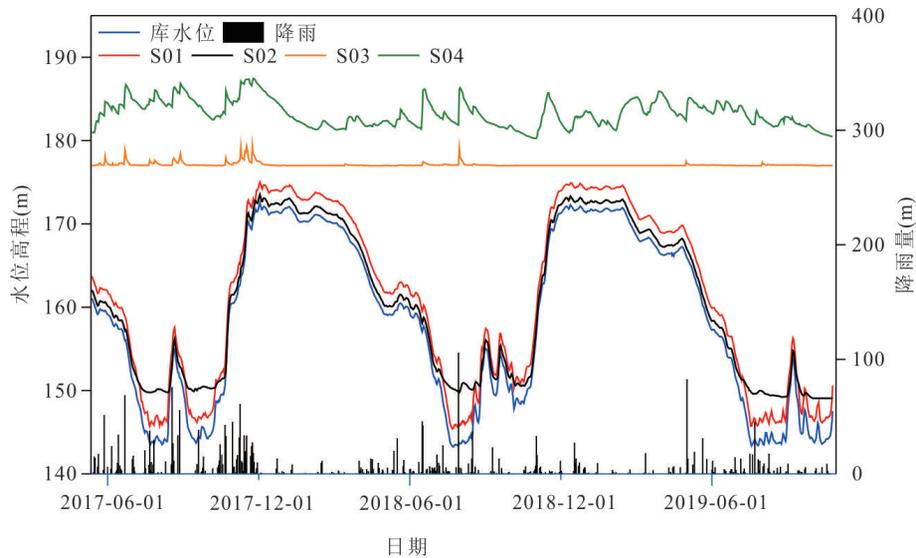


图10 塔坪滑坡地下水变化曲线

Fig.10 Groundwater level curves in the Taping landslide

根据塔坪滑坡安装的地下水监测孔获取塔坪滑坡前、中、后 3 个位置的地下水波动曲线,如图 10 所示.水压计观测结果表明,滑坡前缘的 S01 和 S02 位置的地下水位在整个分析时间段(2017 年 6 月至 2019 年 12 月)与库水位波动的规律较为一致,且两个水压计的地下水位在高水位期的高程几乎相同.在库水位不断下降时,S01 和 S02 监测点的地下水位也随之不断降低;然而,当库水位降至 155 m 以下时,S02 中的地下水位不再继续下降.这必然导致在滑坡前缘,S01 和 S02 之间出现存在较大的水力梯度.当水力梯度增大时,渗流力也相应地增大,这对滑坡前缘的稳定性十分不利.

S03 和 S04 位置的监测结果表明,该位置的地下水位与库水位波动无关,但与降雨密切相关.当滑坡前缘处的库水位快速下降时,坡脚处的地下水位也相应下降.由图 10 可知,当雨季降雨充足时,该位置的地下水位将明显抬升,幅度可达 2~3 m.这将显著增加滑体的含水量,降低了后部滑带土的有效应力.

4 库水和降雨联合作用下塔坪滑坡双滑带渗流与稳定性计算

4.1 数值模型

由现场监测资料可知,塔坪滑坡于 2014—2015

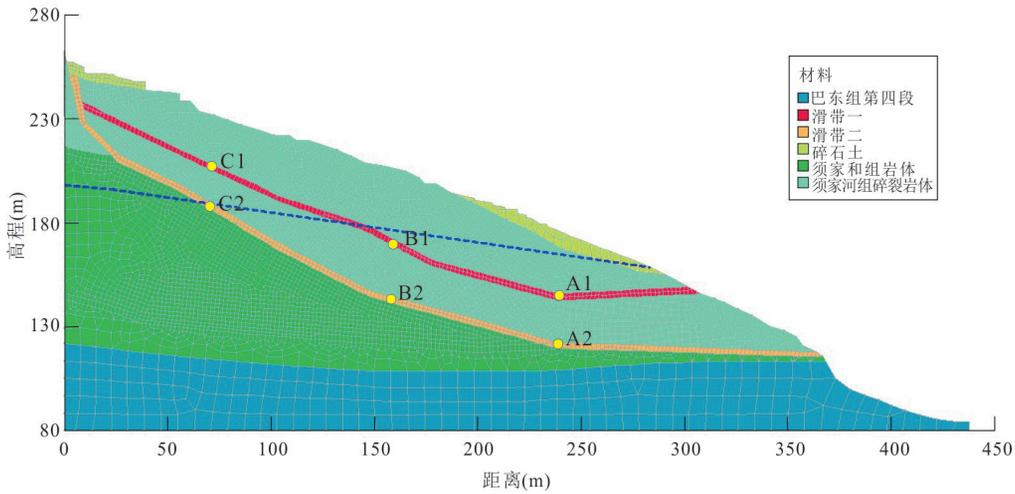


图 11 塔坪滑坡二维数值模型

Fig.11 2D numerical model of the Taping landslide

年出现了最大的位移变形.因此,本节利用 GeoStudio 数值模拟软件,分析 2014—2015 年库水位波动和降雨作用下塔坪滑坡双滑带的渗流场和稳定性变化特征.

依据塔坪滑坡的地质模型可建立塔坪滑坡的数值模型,如图 11.模型共有 9 508 个节点,9 540 个单元.

渗流场计算使用 SEEP/W 模块.考虑二维空间内,单位空间内的一定时间间隔内,流体流入和流出单元体的差等于储水量的变化,相应的二维渗流微分方程如公式(1)所示.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (1)$$

式中: H 为总水头,单位 m; k_x 为 x 方向的渗透系数,单位 m/s; k_y 为 y 方向的渗透系数,单位 m/s; Q 为施加的边界流量,单位 m/s.

二维渗流计算模型的边界条件设置如下:①滑坡前缘坡面施加 2014—2015 水文年(2014 年 9 月 1 日至 2015 年 8 月 31 日)库水位波动边界条件(图 12);②模型左侧地下水水位以上为零流量边界,地下水水位以下设置为定水头边界;③滑坡的底边界设置为不透水边界;④滑坡坡面施加 2014—2015 年降雨入渗边界(图 12).

初始的地下水水位分布,由监测资料可获取(图 11).数值模型材料的力学和水文参数由室内统计试验和现场抽水试验获取,具体见表 1.在滑坡的浅层滑带和深层滑带处分别设置 A1、B1、C1 和 A2、B2、C2 各 3 个孔压监测点.在获取渗流场计算的结果下,将 SEEP/W 中的结果导入 SLOPE/W,采用极

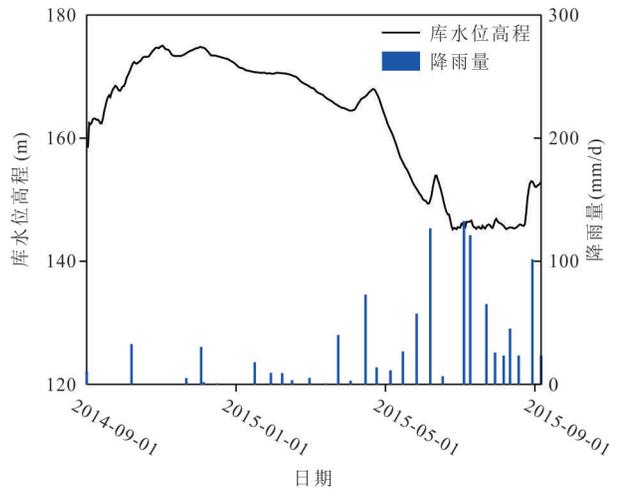


图 12 数值模拟中施加的库水位和降雨

Fig.12 Reservoir water level and precipitation applied in numerical simulation

限平衡 M-P 法,计算库水位和降雨作用下塔坪滑坡浅层滑带和深层滑带的稳定性系数.

4.2 库水和降雨联合作用下双滑带滑坡渗流场

2014—2015 年库水位波动和降雨作用下,塔坪滑坡的渗流场计算结果如图 13 所示.由图可知,初始时刻,滑体内部的地下水水位线后部较高,前部较低(图 13a);库水位在高位运行时(图 13b),滑体内部的地下水水位线较为平缓;库水位下降后,滑体前部地下水水位显著降低,由于此时处于雨季,降雨显著增大了滑坡后部地下水水位的高程(图 13d~13f).此时,滑坡前后缘的水头差显著增大.值得注意的是,浅层滑带中后部存在多处滞水层;然而,深层滑带大部分处于地下水水位之下,因此,降雨产生的滞

水对其影响较小。

图 14 为浅层滑带和深层滑带前、中、后 3 处不同位置的孔隙水压力监测曲线。由图 14a 可知,浅层滑带前部的孔隙水压力主要受到库水位波动的影响。滑带中部的孔隙水压力较小,受到库水位和降雨的联合影响,且降雨对其孔压变化幅度的影响较大。由图可知,降雨后,孔隙水压力有显著的增大,降雨结束后,孔隙水压力又显著减小。滑带后部的监测点大部分时间处于地下水位之上,孔隙水压力为负值,在 4~9 月雨季时,受到降雨入渗的影响,孔隙水压力存在多次显著波动,当滑带处于饱和时,出现了正孔隙水压力。

由图 14b 可知,深层滑带前、中、后 3 处均处于地下水位之下,其孔隙水压力均为正值。前部的孔隙水压力主要受到库水位波动的影响,孔压较大。滑带中部受到库水位和降雨共同的影响,且孔压较大,降雨对孔隙水压力增大的幅度十分有限。后部滑带不受到库水位波动的影响,该点的孔压一直处

于较低值,且在雨季时,该点孔压显著波动。这说明该点的孔压主要受到降雨的影响。

4.3 库水和降雨联合作用下双滑带滑坡稳定性变化特征

本小节采用稳定性系数以及稳定性系数变化率共同评价库水位波动和降雨对双滑带稳定性的影响。稳定性系数变化率如公式(2)所示。

$$\beta = \frac{F_{S_n} - F_{S_{n-1}}}{F_{S_{n-1}}}, \quad (2)$$

式中: β 为滑坡稳定性系数变化率, F_{S_n} 为 n 天滑坡的稳定性系数, $F_{S_{n-1}}$ 为 $n-1$ 天滑坡的稳定性系数,其中 n 大于 1。

由图 15 可知,在库水位和降雨联合作用下,塔坪滑坡浅层滑带和深层滑带的稳定性系数的变化规律显著不同。9~11 月库水位抬升期,浅层滑带的稳定性系数不断降低,而深层滑带的稳定性系数不断增大。1~4 月库水位缓慢降低期,浅层滑带的稳定性系数较为稳定,而深层滑带的稳定性系数缓慢降低。4~7 月库水位快速下降期,深层滑带的稳定性系数也快速降低;而浅层滑带整体为增大的趋势,但其受到降雨的影响,强降雨后,稳定性系数显著降低,降雨结束后稳定性系数有显著增大。7~9 月库水位处于低位运行期,该时期降雨强度较大,因此浅层和深层滑带的稳定性系数均主要受到降雨的影响。可进一步地选取同一时步下双层滑带中较小的稳定性系数,获取塔坪滑坡的整体稳定性系数。由图 15 可知,在高水位期,浅层滑带为最危险的滑带;库水位下降及低水位期,深层滑带为最危险滑带。

表 1 数值模型中材料的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters applied in numerical modeling

材料	容重 (kN/m ³)	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	饱和渗透系数 (m/d)
碎石土	20.62	25.21	23.5	5
碎裂岩体	24.62	43.50	35.2	3
滑带一	17.90	32.00	18.8	2
滑带二	17.90	32.00	20.9	2
石英砂岩		基岩		0.2

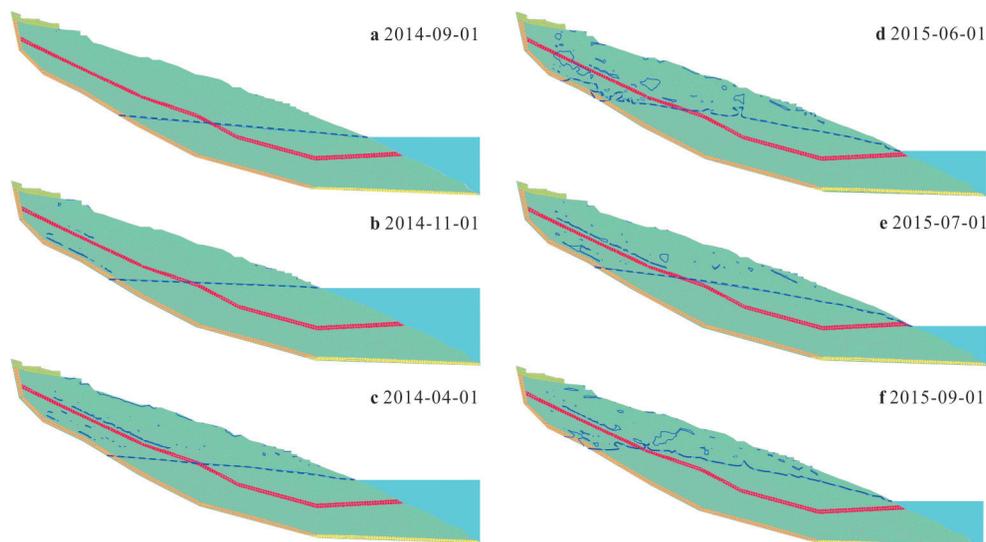


图 13 库水位波动和降雨联合作用下塔坪滑坡浸润线

Fig.13 Seepage lines of the Taping landslide under combined action of reservoir water level and precipitation

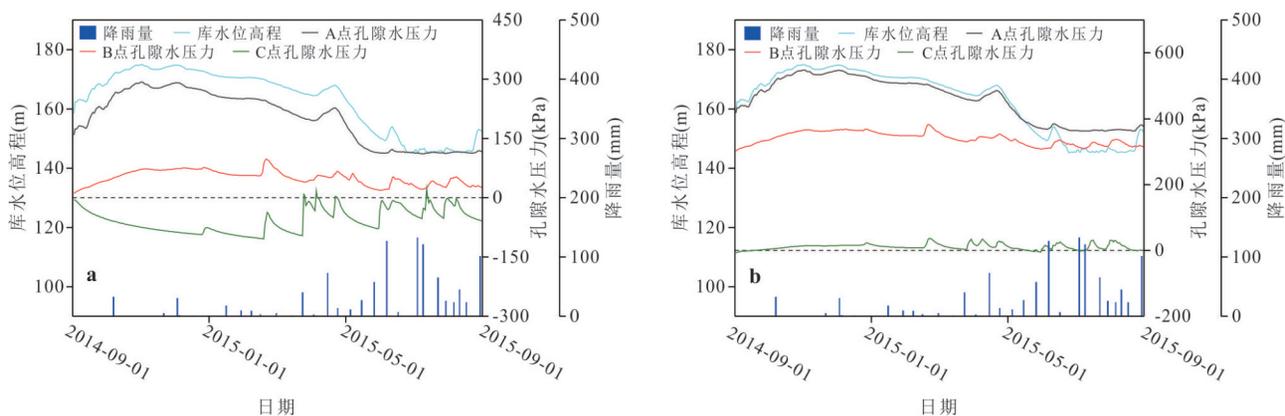


图 14 双滑带孔隙水压力波动

Fig.14 Porewater pressure variation in the double sliding zones

a. 浅层滑带;b. 深层滑带

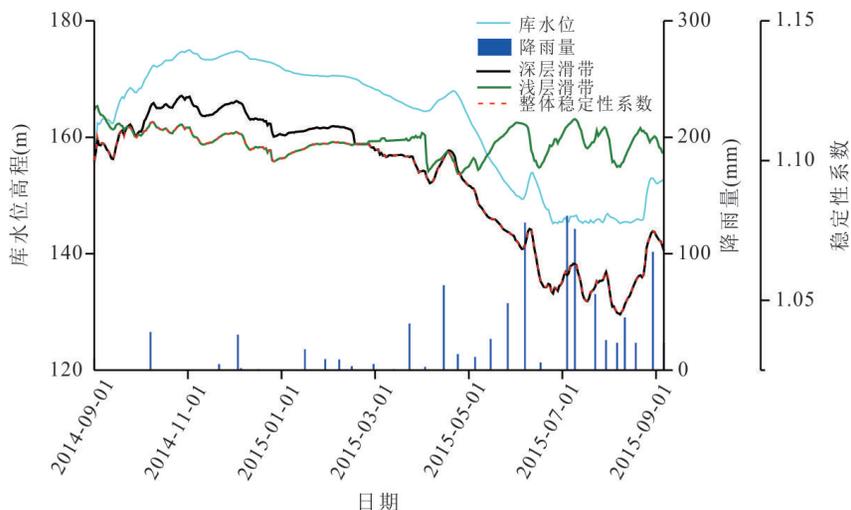


图 15 2014—2015塔坪滑坡双滑带稳定性变化曲线

Fig.15 FOS variation curves of the Taping landslide during 2014—2015

将数值模拟获取的 2014—2015 年整体稳定性系数与监测的地表位移 (J24 和 J26) 进行对比. 由图 16 可知, 2014 年 9 月~2015 年 5 月, 库水位抬升期和高位运行期, 滑坡的整体稳定性系数较为稳定, 且地表位移无显著增大. 2015 年 5 月后, 随着库水位下降, 计算获取的滑坡整体稳定性系数显著降低, 与此同时地表位移显著增大. 特别是 2015 年 6 月, 计算获取的稳定性系数急剧降低, 此时地表位移也急剧增大. 由图可知, 计算获取的稳定性系数与地表监测数据之间的规律吻合性非常好. 以上分析表明, 本文数值模拟的结果可信.

进一步探究浅层滑带和深层滑带的稳定性系数变化率与库水位高程及降雨强度的关系. 稳定性系数变化率为正值时, 表明滑坡的稳定性系数不断增大; 稳定性系数变化率为负值时, 表明滑坡的稳

定性系数不断降低. 且绝对值越大, 表明趋势越明显. 由图 17a 可知, 浅层滑带稳定性系数变化率受到降雨强度的影响. 降雨量越大, 浅层滑坡的稳定性系数变化率变为负值, 且绝对值不断增大, 这表明降雨量越大, 滑坡稳定性降低的趋势越明显. 由图可知, 浅层滑带稳定性系数变化率也受到库水位高程的影响, 库水位高程越大, 浅层滑坡的稳定性系数变化率变为负值, 且不断增大. 这表明, 库水位高程越大, 滑坡稳定性降低的趋势越明显.

由图 17b 可知, 深层滑带稳定性系数变化率不受降雨强度的影响, 但是受到库水位高程的影响. 在较低的库水位下, 深层滑带稳定性系数变化率大部分处于负值; 在较高的库水位下, 深层滑带稳定性系数变化率大部分处于正值. 由图可知, 160 m 库水位高程大致是一个临界点. 以上结果表明, 当库

水位处于 160 m 高程以下时, 深层滑带的稳定性系数主要以减小为主, 当库水位高程处于 160 m 以上时, 深层滑带的稳定性系数主要以增大为主。

图 18 为稳定性系数变化率与库水位高程变化率之间的关系。库水位变化率为负值时, 表明库水位降低, 为正值时, 表明库水位抬升。由图可知, 浅层滑带的稳定性系数变化率与库水位高程变化率无明显的相关性。而深层滑带的稳定性系数变化率与库水位高程变化率有明显的正相关性。这表明, 库水位抬升速率越快, 深层滑带的稳定性增大得越快, 库水位下降速率越快, 深层滑带的稳定性下降

的也越快。

图 19 为降雨与塔坪滑坡的深层滑带和浅层滑带稳定性变化率之间的关系。由图可知, 浅层滑带的稳定性系数变化率与当日降雨、三日平均降雨的相关性不强, 而与其与七日平均降雨的相关性较强。当前关于降雨事件下滑坡风险评价和稳定性计算中, 往往采用 24 h 极端降雨量 (陶志刚等, 2022) 或者三日极端、平均降雨量进行分析 (张晨阳等, 2019)。本文的研究结果表明, 对于大型的滑坡 (如本文的塔坪滑坡), 由于其滑体较厚, 降雨入渗对滑坡稳定性的影响有一定的滞后性。采用七日平均降雨

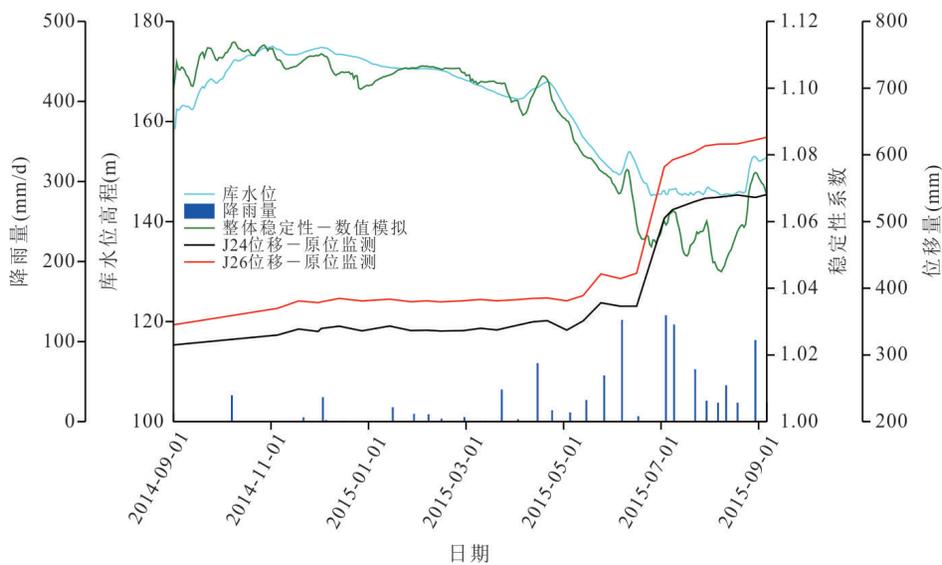


图 16 滑坡整体稳定性与地表监测数据对比曲线

Fig.16 Comparison between FOS curves and displacement curves of the Taping landslide

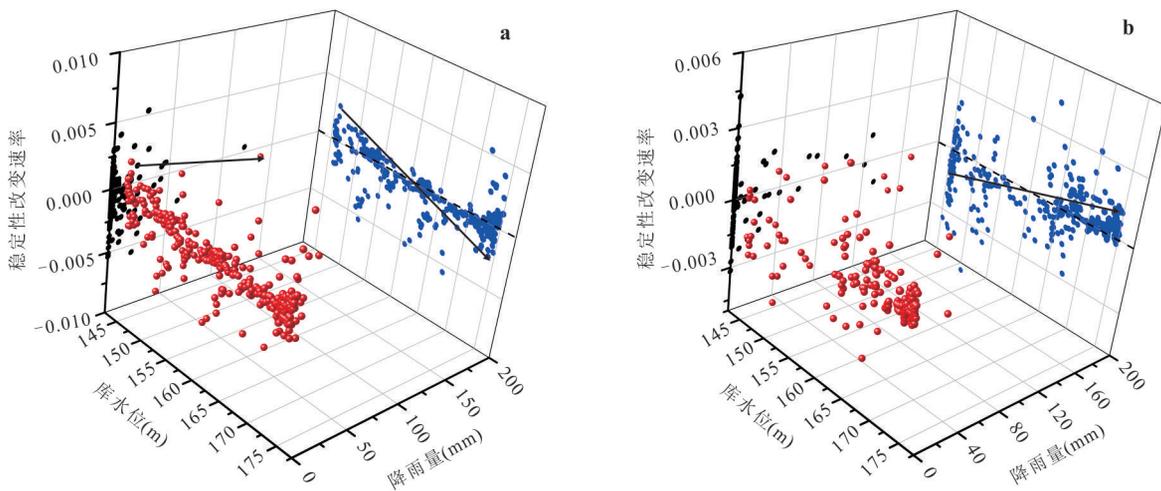


图 17 滑坡稳定性系数变化率与库水位高程及降雨强度的关系

Fig.17 Relationship between the change rate of FOS and the reservoir water level and precipitation

a. 浅层滑带; b. 深层滑带

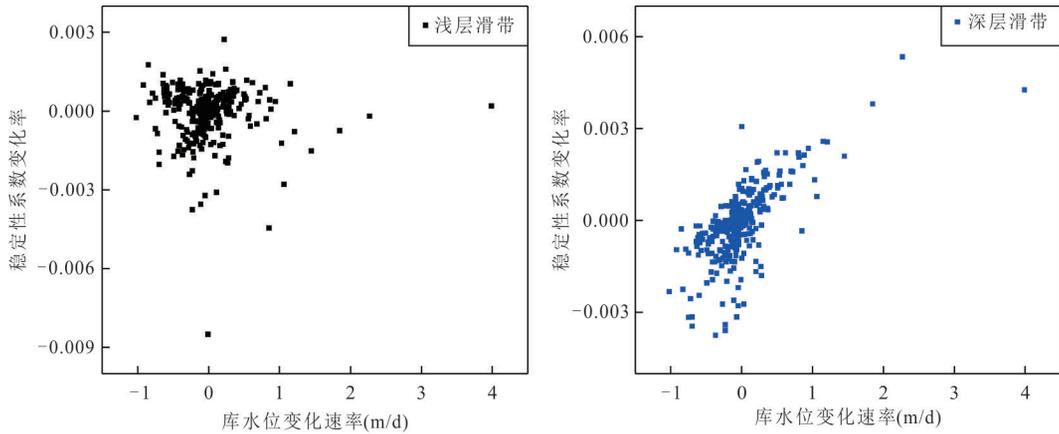


图 18 库水位升降速率与稳定性变化率之间的关系

Fig.18 Relationship between fluctuation rate of reservoir water level and change rate of FOS

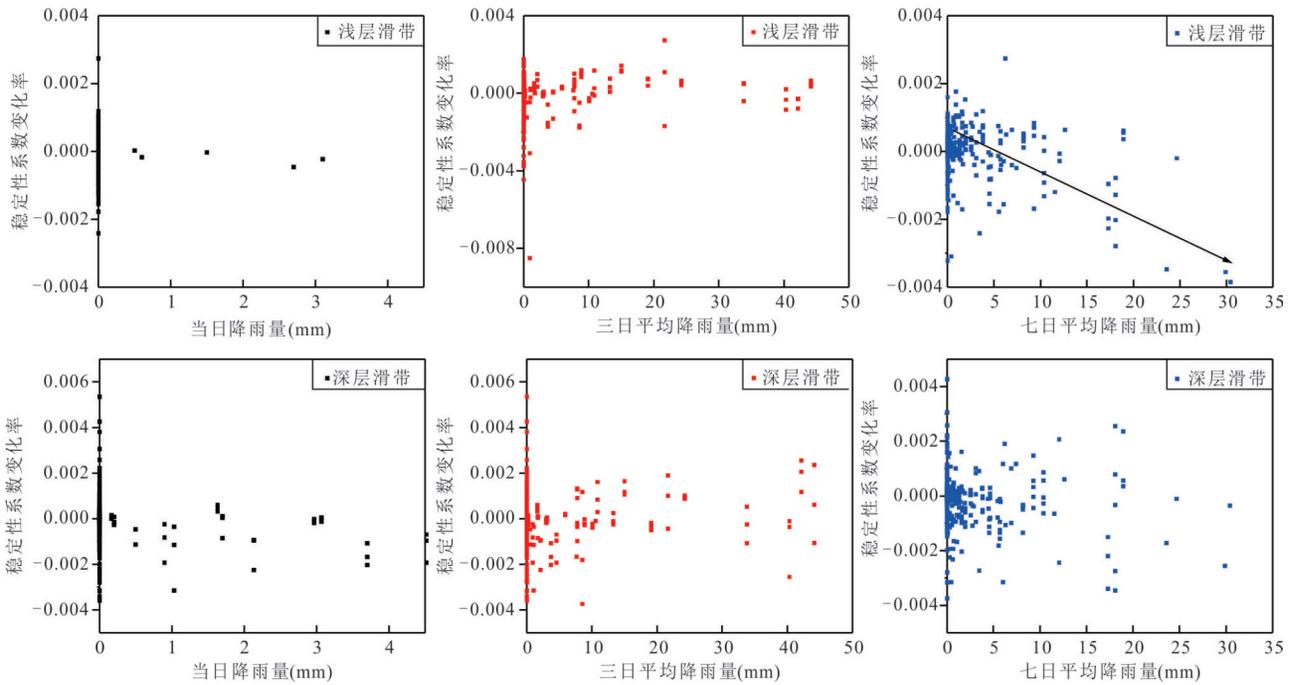


图 19 降雨与稳定性变化率之间的关系

Fig.19 Relationship between precipitation and change rate of FOS

可以更好地对其稳定性进行评价, 计算结果更加准确. 由图 19 可知, 深层滑带的稳定性系数变化率与当日降雨、三日平均降雨、七日平均降雨的相关性均不强.

5 讨论

由本文结果可知, 降雨主要对塔坪滑坡浅层滑带产生较大的影响. 降雨入渗会显著增大滑体自重, 且降雨入渗至滑带位置处会降低浅层滑带的力学参数, 减小其有效应力. 因此, 降雨对浅层滑带的稳定性十分不利. 从图 15 中可知, 降雨期浅层滑带

的稳定性显著降低. 且通过数据分析可知, 七日均降雨强度越大, 浅层滑带的稳定性系数降低得越快. 而对于深层滑带而言, 由于滑带的埋深可达 60 m 及以上, 且在浅层滑带的隔绝作用下, 雨水较难渗入. 因此, 降雨对深层滑带稳定性的影响有限.

库水位对滑坡的作用主要受到浮托力、渗透压力、坡面水压力三者共同作用的影响. 将数值模拟中浅层滑带和深层滑带的坡面水压力、浅层滑带 A1-剪出口之间的水力梯度以及深层滑带 A2-剪出口之间的水力梯度计算出来(图 20). 由于浅层滑带和深层滑带的位置不同, 导致了稳定性对库水位的

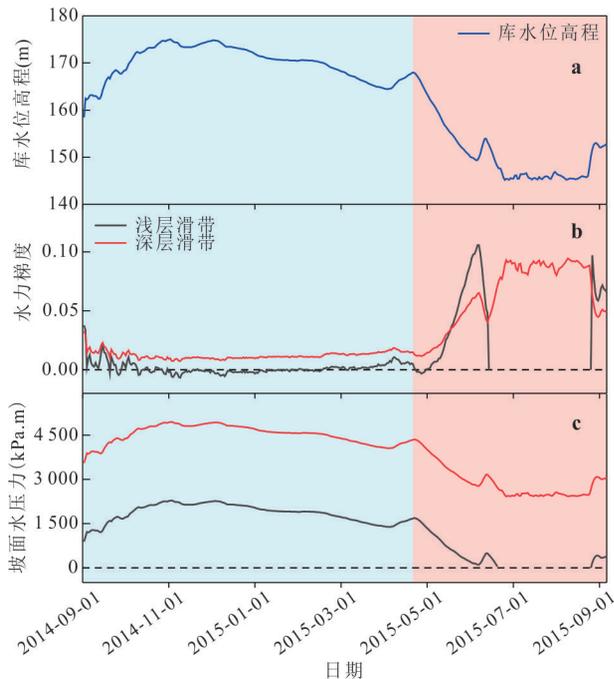


图 20 塔坪滑坡坡面水压力和水力梯度曲线

Fig.20 Surface water pressure and hydraulic gradient of the Taping landslide

响应显著不同.对于浅层滑带,在高水位期,中前部滑体受到浮托力的作用显著增大(图 14a),且滑带位置较高,坡面水压力的反压作用较小(图 20c).因此,随着库水位抬升,浅层滑带的稳定性不断降低,库水位下降,稳定性不断增大.对于深层滑带而言,滑带的位置较低,在高水位期,坡体前部的库水位反压作用较强(图 20c),有利于滑坡的稳定.随着库水位的下降,坡体中前部水头差不断增大(图 20b),中前部渗透力不断增大,这显著增大了滑坡的下滑力.由于深层滑带的位置较深,库水位下降导致滑带位置孔隙水压力降低的幅度较小(图 14b).而滑坡坡面的库水位反压作用显著降低,又进一步降低了滑坡的稳定性.因此,库水位提高,深层滑坡的稳定性提高,库水位降低,滑坡稳定性减小.

本文的研究结果仅限于塔坪滑坡的这一典型案例,该滑坡的浅层滑带位置在 145 m 的高程处,深层滑带的位置在 100 m 的高程处.当不同滑坡的双层滑带的高程不同时,其稳定性对库水位和降雨的响应也会显著不同.因此,相关的研究有待进一步深入.

6 结论

本文通过现场勘察、钻孔资料分析以及长期监

测的手段,获取了塔坪滑坡的变形破坏特征及渗流特征.并进一步采用数值模拟的手段,探讨了库水位和降雨联合作用下,双滑带滑坡的渗流场和稳定性变化规律.得出以下几点结论:

(1)塔坪滑坡为一库岸大型的古滑坡,滑体组成物质为碎裂岩体,其存在明显的双层滑带结构.塔坪滑坡为阶梯式变形模式,其特征是短时间内快速运动和长时间内缓慢运动的循环交替.每年的雨季和库水位下降期,滑坡的变形速度增大,快速运动期从 6 月持续到 8 月.

(2)塔坪滑坡的前缘变形较大,中部变形较小,后部基本稳定性,因此可相应分为强变形区、中等变形区、基本稳定性区 3 个部分.塔坪滑坡表现为显著的前缘牵引式渐进破坏模式.

(3)降雨主要对塔坪滑坡浅层滑带的稳定性产生较大的影响,且对深层滑带稳定性的影响较小.

(4)库水位对滑坡的作用主要受到浮托力、渗透压力、坡面水压力三者共同作用的影响.由于浅层滑带和深层滑带的位置不同,导致了稳定性对库水位的响应显著不同.随着库水位的抬升,浅层滑带的稳定性不断降低,库水位下降,稳定性不断增大.对于深层滑带而言,库水位提高,深层滑坡的稳定性增大,库水位降低,滑坡稳定性减小.

References

- Dai, Z.W., Yin, Y.P., Wei, Y.J., et al., 2015. Characteristics, Origin and Formation Mechanism of the Outang Landslide in the Three Gorges Reservoir Area. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 42(6): 145–153 (in Chinese with English abstract).
- Dai, Z.W., Yin, Y.P., Wei, Y.J., et al., 2016. Deformation and Failure Mechanism of Outang Landslide in Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Engineering Geology*, 24(1): 44–55 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Q. L., Wang, X. P., 2000. Growth History of Huangtupo Landslide: Down-Slope Overlapping-Landsliding-Modification. *Earth Science*, 25(1): 44–50 (in Chinese with English abstract).
- Huang, D., Gu, D.M., Song, Y.X., et al., 2018. Towards a Complete Understanding of the Triggering Mechanism of a Large Reactivated Landslide in the Three Gorges Reservoir. *Engineering Geology*, 238: 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.008>
- Kamran, M., Hu, X. W., Hussain, M. A., et al., 2023. Dynamic Response and Deformation Behavior of Kadui-2

- Landslide Influenced by Reservoir Impoundment and Rainfall, Baoxing, China. *Journal of Earth Science*, 34(3): 911–923. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1649-6>
- Lane, P. A., Griffiths, D. V., 2000. Assessment of Stability of Slopes under Drawdown Conditions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5): 443–450. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2000\)126:5\(443\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2000)126:5(443))
- Lu, S.Q., Yi, Q.L., Yi, W., et al., 2014a. Analysis of Deformation and Failure Mechanism of Shuping Landslide in Three Gorges Reservoir Area. *Rock and Soil Mechanics*, 35(4): 1123–1130, 1202 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S.Q., Yi, Q.L., Yi, W., et al., 2014b. Study on Dynamic Deformation Mechanism of Landslide in Drawdown of Reservoir Water Level—Take Baishuihe Landslide in Three Gorges Reservoir Area for Example. *Journal of Engineering Geology*, 22(5): 869–875 (in Chinese with English abstract).
- Müller, L., 1964. The Rock Slide in the Vajont Valley. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 2(3): 148–212.
- Paronuzzi, P., Rigo, E., Bolla, A., 2013. Influence of Filling–Drawdown Cycles of the Vajont Reservoir on Mt. Toc Slope Stability. *Geomorphology*, 191: 75–93. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.004>
- Shi, X. G., Xu, J. H., Jiang, H. J., et al., 2019. Slope Stability State Monitoring and Updating of the Outang Landslide, Three Gorges Area with Time Series InSAR Analysis. *Earth Science*, 44(12): 4284–4292(in Chinese with English abstract).
- Song, K., Yan, E.C., Zhu, D.P., et al., 2011. Base on Permeability of Landslide and Reservoir Water Change to Research Variational Regularity of Landslide Stability. *Rock and Soil Mechanics*, 32(9): 2798–2802 (in Chinese with English abstract).
- Song, K., Chen, L.Y., Liu, Y.L., et al., 2022. Dynamic Mechanism of Rain Infiltration in Deep-Seated Landslide Reactivate Deformation. *Earth Science*, 47(10): 3665–3676(in Chinese with English abstract).
- Tang, H.M., Wasowski, J., Juang, C.H., 2019. Geohazards in the Three Gorges Reservoir Area, China—Lessons Learned from Decades of Research. *Engineering Geology*, 261: 105267. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105267>
- Tao, Z. G., Luo, S. L., Zhu, C., et al., 2022. Dynamic Mechanical Monitoring of Landslide and Case Analysis of Failure Process. *Journal of Engineering Geology*, 30(1): 177–186(in Chinese with English abstract).
- Terzaghi, K., 1950. Mechanism of Landslides. In: Paige, S., ed., *Application of Geology to Engineering Practice*. Geotechnical Society of America, Berkeley, 83–123. <https://doi.org/10.1130/Berkey.1950.83>
- Wang, F.W., Zhang, Y.M., Wang, G.H., et al., 2007. Deformation Features of Shuping Landslide Caused by Water Level Changes in Three Gorges Reservoir Area, China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 509–517 (in Chinese with English abstract).
- Wei, T.Y., Yin, Y.P., Gao, Y., et al., 2020. Deformation Mechanism of the Taping H1 Landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir Area. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 47(4): 73–81 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, J. F., Li, Y. A., Cai, J. M., 2020. Model Test Research on Response Characteristics of Outang Landslide under Water Level Fluctuation. *Journal of Engineering Geology*, 28(5): 1049–1056(in Chinese with English abstract).
- Xiao, S. R., Lu, S. S., Guan, H. F., et al., 2013. Study of Geomechanical Model of Liangshuijing Landslide in Three Gorges Reservoir Area. *Rock and Soil Mechanics*, 34(12): 3534–3542(in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Jian, W.X., Yang, H.F., et al., 2012. Dynamic Variation Rule of Phreatic Line in Huangtupo Landslide in Three Gorges Reservoir Area. *Rock and Soil Mechanics*, 33(3): 853–858 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y.P., 2003. Seepage Pressure Effect on Landslide Stability at the Three Gorges Reservoir Area. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 14(3): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y.P., Zhang, C.Y., Yan, H., et al., 2022. Study on Seepage Stability and Prevention Design of Landslide in Three Gorges Reservoir Water Storage Operation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(4): 649–659(in Chinese with English abstract).
- Zangerl, C., Eberhardt, E., Perzmaier, S., 2010. Kinematic Behaviour and Velocity Characteristics of a Complex Deep-Seated Crystalline Rockslide System in Relation to Its Interaction with a Dam Reservoir. *Engineering Geology*, 112(1–4): 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.01.001>

- Zhang, C. Y., Yin, Y. P., Yan, H., et al., 2021. Reactivation Characteristics and Hydrological Inducing Factors of a Massive Ancient Landslide in the Three Gorges Reservoir, China. *Engineering Geology*, 292: 106273. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106273>
- Zhang, C. Y., Yin, Y. P., Yan, H., et al., 2023. Centrifuge Modeling of Unreinforced and Multi-Row Stabilizing Piles Reinforced Landslides Subjected to Reservoir Water Level Fluctuation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 20(3): 559–577. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.09.025>
- Zhang, C. Y., Zhang, T. L., Zhang, M., et al., 2019. Rainfall Infiltration Characteristics and Numerical Simulation of Slope Instability in the Basalt Residual Soil in the Coastal Area of Southeast China. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 46(4): 42–50(in Chinese with English abstract).
- Zhao, R. X., Yin, Y. P., Li, B., et al., 2017. Research on the Colluvial Landslide Stability during Reservoir Water Level Fluctuation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 48(4): 435–445(in Chinese with English abstract).
- 中文参考文献**
- 代贞伟, 殷跃平, 魏云杰, 等, 2015. 三峡库区藕塘滑坡特征、成因及形成机制研究. *水文地质工程地质*, 42(6): 145–153.
- 代贞伟, 殷跃平, 魏云杰, 等, 2016. 三峡库区藕塘滑坡变形失稳机制研究. *工程地质学报*, 24(1): 44–55.
- 邓清禄, 王学平, 2000. 黄土坡滑坡的发育历史: 坠覆—滑坡—改造. *地球科学*, 25(1): 44–50.
- 卢书强, 易庆林, 易武, 等, 2014a. 三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析. *岩土力学*, 35(4): 1123–1130, 1202.
- 卢书强, 易庆林, 易武, 等, 2014b. 库水下降作用下滑坡动态变形机理分析: 以三峡库区白水河滑坡为例. *工程地质学报*, 22(5): 869–875.
- 史绪国, 徐金虎, 蒋厚军, 等, 2019. 时序 InSAR 技术三峡库区藕塘滑坡稳定性监测与状态更新. *地球科学*, 44(12): 4284–4292.
- 宋琨, 晏鄂川, 朱大鹏, 等, 2011. 基于滑体渗透性与库水变动的滑坡稳定性变化规律研究. *岩土力学*, 32(9): 2798–2802.
- 宋琨, 陈伦怡, 刘艺梁, 等, 2022. 降雨诱发深层老滑坡复活变形的动态作用机制. *地球科学*, 47(10): 3665–3676.
- 陶志刚, 罗森林, 朱淳, 等, 2022. 滑坡动态力学监测及破坏过程案例分析. *工程地质学报*, 30(1): 177–186.
- 汪发武, 张业明, 王功辉, 等, 2007. 三峡库区树坪滑坡受库水位变化产生的变形特征. *岩石力学与工程学报*, 26(3): 509–517.
- 卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 等, 2020. 三峡库区巫山县塔坪 H1 滑坡变形机制. *水文地质工程地质*, 47(4): 73–81.
- 肖捷夫, 李云安, 蔡浚明, 2020. 水位涨落作用下藕塘滑坡响应特征模型试验研究. *工程地质学报*, 28(5): 1049–1056.
- 肖诗荣, 卢树盛, 管宏飞, 等, 2013. 三峡库区凉水井滑坡地质力学模型研究. *岩土力学*, 34(12): 3534–3542.
- 杨金, 简文星, 杨虎锋, 等, 2012. 三峡库区黄土坡滑坡浸润线动态变化规律研究. *岩土力学*, 33(3): 853–858.
- 殷跃平, 2003. 三峡库区地下水渗透压力对滑坡稳定性影响研究. *中国地质灾害与防治学报*, 14(3): 1–8.
- 殷跃平, 张晨阳, 闫慧, 等, 2022. 三峡水库蓄水运行滑坡渗流稳定和防治设计研究. *岩石力学与工程学报*, 41(4): 649–659.
- 张晨阳, 张泰丽, 张明, 等, 2019. 东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟. *水文地质工程地质*, 46(4): 42–50.
- 赵瑞欣, 殷跃平, 李滨, 等, 2017. 库水波动下堆积层滑坡稳定性研究. *水利学报*, 48(4): 435–445.